

**DESARROLLO DE UN MODELO ANALÍTICO PARA LA EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN
ESTRUCTURAL DE HORNOS ROTATORIOS DE CLINKERIZACIÓN**

ING. DEVINSON JESUS GIL SANCHEZ

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISION DE POSTGRADOS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2012**

**DESARROLLO DE UN MODELO ANALÍTICO PARA LA EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN
ESTRUCTURAL DE HORNOS ROTATORIOS DE CLINKERIZACIÓN**

ING. DEVINSON JESUS GIL SANCHEZ

**Monografía presentada como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica
con énfasis en Diseño.**

ASESOR:

ING. HERIBERTO ENRIQUE MAURY RAMIREZ, Ph. D

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISION DE POSTGRADOS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2012**

Aprobado por la División de postgrados e investigaciones en Ingeniería en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magíster en Ingeniería Mecánica con Énfasis en conversión de Energía.

Director del Proyecto

Firma del jurado

Firma del jurado

Corrector del Proyecto

Dedico este trabajo a mis señores padres quienes me han apoyado en los diferentes momentos y decisiones de mi vida

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento:

A Dios por las condiciones favorables en todos los aspectos para que este trabajo fuera una realidad.

A mis padres por el soporte y la insistencia para finalizar.

A Heriberto por su acompañamiento y consejos.

A la Universidad del Norte, representada en el staff del departamento de ingeniería mecánica. Gratos momentos y experiencias...

A mi princesa por su comprensión...

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	5
CAPÍTULO I	9
INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Antecedentes	9
1.2. Planteamiento del problema	11
1.3. Justificación.....	11
1.4. Objetivos.....	12
1.5. Metodología de la investigación.....	13
CAPÍTULO II	15
<i>DESARROLLO DEL MODELO INTEGRADO.....</i>	15
2.1. Introducción.....	15
2.1.1. Selección del modelo analítico a implementar.....	17
2.2. Desarrollo del modelo estructural del horno.	18
2.2.1. Seccionamiento del horno en tramos de propiedades y configuraciones homogéneas.....	18
2.2.2. Determinación de la carga asociada a cada tramo.	20
2.2.3. Determinación de la inercia asociada a cada tramo.....	21
2.2.4. Montaje de las ecuaciones de cortante, flector, elástica y deformación para cada tramo.....	22
2.2.5. Determinación del valor de las reacciones y de las constantes de integración.	23
2.3. Evaluación de indicadores estructurales del Shell y de las llantas. .	25
2.3.1. Cálculo de los esfuerzos en el Shell.....	25
2.3.2. Determinación de la sección crítica del horno.	27
2.3.3. Cálculo del factor de seguridad estático.....	28
2.3.4. Cálculo del factor de seguridad a fatiga.	28
2.3.5. Cálculo de la vida residual del Shell para cargas cíclicas:	30
2.3.6. Cálculo de la ovalidad de las llantas.....	32

CAPÍTULO III 33

Resultados y Análisis de Resultados 33

3.1. Datos de entrada del modelo. 33

3.2. Resultados 37

3.3. Análisis de resultados..... 43

CONCLUSIONES..... 46

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS. 49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la metodología a utilizar.	14
Figura 2. Configuración típica de un horno rotatorio vía húmeda de diámetro variable.....	15
Figura 3. Vista general de un conjunto llanta-rodillos.	16
Figura 4. Seccionamiento del horno en tramos de carga e inercia constante.	19
Figura 5. Cambio de inercias debida al cambio de diámetros	21
Figura 6. Cargas sobre tramo i.....	22
Figura 7. Diagrama de fuerza cortante	37
Figura 8 Diagrama de momentos flectores.....	37
Figura 9 Diagrama de momentos torsores a lo largo del horno.	38
Figura 10 Diagrama de fuerzas axiales	38
Figura 11 Diagrama de la elástica.....	39
Figura 12 Diagrama de desplazamientos en el horno.	39
Figura 13 Diagrama de esfuerzos cortantes	40
Figura 14 Diagrama de esfuerzos flectores a lo largo del horno.	40
Figura 15 Diagrama de esfuerzos torsores	41
Figura 16 Diagrama de esfuerzos equivalente de Von Misses.	41
Figura 17 Indicadores salud estructural del shell.....	42
Figura 18 Indicadores de integridad estructural de los apoyos.....	42
Figura 19 Esfuerzos de Von Misses modelo híbrido	43
Figura 20 Diagrama de desplazamientos modelo híbrido	44
Figura 21 Comparación de tiempos modelo híbrido	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ubicación de los apoyos y características de las llantas.	33
Tabla 2 Diámetros del horno	34
Tabla 3 Espesores del Shell o virola.	34
Tabla 4 Densidad de refractarios.....	35
Tabla 5 Espesor del refractario.....	35
Tabla 6 Zona de carga de cadenas constantes.....	35
Tabla 7 Densidad de la pasta.....	36

INTRODUCCIÓN

1.1. *Antecedentes*

Dentro de toda planta industrial existen elementos y equipos que se constituyen en el alma del proceso debido a que su intervención en él representa la transformación más significativa de la materia prima y/o se constituye en el factor más relevante para la obtención de un excelente producto final, lo anterior sumado a la creciente producción de las industrias ha hecho que las expectativas de funcionamiento ininterrumpido de los denominados “equipos vitales” aumenten, trayendo como resultado que los tiempos muertos debidos a paradas no programadas de los equipos cada día sean más costosas. Dada la necesidad de incrementar la disponibilidad y mejorar los históricos de funcionamiento de las máquinas, el monitoreo basado en condiciones ha ganado importancia en el sector industrial [10], [16].

Particularizando para la industria cementera, los hornos de clinkerización se constituyen en uno de esos equipos vitales para el proceso de producción de cemento, ya que: en su interior se dan las transformaciones químicas más importantes. Su disponibilidad y funcionamiento son una medida directa de la productividad de la planta y sus costos de parada son significativos no solo por el costo de los consumibles o partes sino por la producción perdida.

Según información técnica las principales interrupciones en la producción de cemento de las plantas se debe a paradas en los hornos, que a su vez según datos estadísticos se relacionan un 80% de las veces con fallas en el refractario. [15]

Resultados de investigaciones [14],[15], [17] apuntan a que las principales causas de las fallas del refractario se atribuyen a sus condiciones mecánicas y estructurales, según se describe a continuación:

El revestimiento refractario de un horno de clinkerización está sujeto a una variedad de efectos mecánicos de dos tipos:

- Erosión e impacto.
- Deformaciones radiales, axiales y cargas torsionales.

Los primeros son derivados del paso de la pasta por el interior del horno y los segundos de la interacción entre la virola y el revestimiento refractario. [14]

La virola sufre deformaciones elásticas radiales periódicamente con la rotación del horno y precisamente son estas las responsables de los esfuerzos generados en el revestimiento refractario. Cuantitativamente, la deformación radial de la virola está definida en términos de la ovalidad y es posible medirla utilizando los equipos adecuados, entre los más utilizados se encuentran disponibles los tipo “Shell-test” en una amplia variedad [1][2][3][4][5][6][7][8]. Para grandes deformaciones los esfuerzos de compresión, flexión, torsión o tensión generan grietas y causan descascaramiento en el material refractario; ocasionalmente ladrillos individuales o incluso secciones enteras del revestimiento podrían desprenderse dejando desnuda la lámina de acero de la virola, exponiéndola a las altas temperaturas internas que pueden alcanzar hasta los 1100°C; esta situación describe una de los escenarios de paradas más común de los hornos rotatorios. [14].

Para prevenir lo anterior, durante la operación normal se realizan inspecciones regulares para determinar la ovalidad de la virola con el fin de verificar que está operando dentro de los rangos de cargas y esfuerzos establecidos por el diseñador, garantizando así la integridad del revestimiento refractario y como resultado la disponibilidad del equipo.

Dentro de la industria cementera es una práctica aceptada de forma generalizada que estas inspecciones sean contratadas con empresas especializadas en la prestación de este tipo de servicios. Actualmente estas empresas utilizan métodos de inspección que pueden ser realizados mientras el horno esta en operación con sistemas de adquisición de datos basados en técnicas de medición avanzadas, procesamiento de la información en programas con algoritmos complejos, desarrollados con base en años de experiencia y cuidados celosamente por sus desarrolladores; los resultados obtenidos luego son evaluados por especialistas altamente calificados quienes al final entregan un reporte del estado de los diferentes componentes y las recomendaciones pertinentes. Dada la especialidad de los recursos tanto de medición, informáticos y humanos el costo de cada uno de estos análisis puede estar alrededor de los USD\$85.000 por horno.

1.2. *Planteamiento del problema*

Los principales responsables del funcionamiento del horno dentro de las plantas cementeras son los departamentos de producción quienes se encargan de fijar los parámetros de operación tanto mecánicos como térmicos para obtener la producción necesaria y los departamentos de mantenimiento quienes responden por la disponibilidad del equipo. En la actualidad estos departamentos no cuentan con una herramienta que de forma sencilla, económica, rápida y confiable les permita conocer el estado estructural de los componentes del horno bajo las condiciones de operación fijadas por la producción y con base en los históricos de funcionamiento estimar la vida remanente de los mismos.

1.3. *Justificación*

A pesar de que la gran mayoría de plantas de cemento cuentan con personal de mantenimiento altamente calificado y con vasta experiencia, no es económicamente rentable ni técnicamente viable para las plantas cementeras adquirir los dispositivos de medición y desarrollar los programas de computadora requeridos para la adquisición, procesamiento y análisis de la información, como los descritos en la sección anterior. Además, es claro que para los departamentos de producción y mantenimiento es importante contar con una herramienta que les permita realizar de una forma objetiva la toma de decisiones, a los primeros para conocer cuantitativamente los impactos estructurales generados por los cambios en las condiciones de operación sufridos durante el funcionamiento normal de los hornos y a los segundos para evaluar la integridad estructural y estimar la vida residual de los componentes bajo unas condiciones de operación determinadas.

Con el desarrollo del presente trabajo se pretende desarrollar un modelo que con las características constitutivas, geométricas y operativas del equipo brinde a los usuarios una evaluación rápida, eficaz, confiable y económica del estado estructural de dos de los principales componentes del horno: las llantas y la virola o Shell. Para el primero de estos el indicador a calcular será la ovalidad y para el segundo los factores de seguridad estáticos, a fatiga y vida residual.

1.4. Objetivos

A continuación se encuentran detallados los objetivos generales y específicos de la presente investigación.

Objetivos Generales

Desarrollar un modelo analítico integrado que permita conocer de forma confiable, rápida y sencilla el estado estructural de un horno rotatorio de clinkerización en términos de ovalidad, factores de seguridad estáticos, de fatiga y vida residual.

Objetivos Específicos

Para poder alcanzar el objetivo general descrito es necesario apuntar hacia los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión del estado del arte y de la técnica para identificar modelos que evalúen estructuralmente componentes de hornos de cemento.
- Desarrollar, en el marco de la mecánica de sólidos, un *modelo analítico para la determinación de los diagramas de carga* a lo largo de toda la estructura del horno.
- Evaluar indicadores estructurales para los elementos críticos del horno, Shell y aros de rodadura
- Sistematizar los modelos en una herramienta de cómputo que brinde como resultados las evaluaciones a cargas cíclicas y vida residual del Shell y la ovalidad de los aros de rodadura.
- Comparar los resultados obtenidos mediante el modelo integrado contra los obtenidos a través de modelos numéricos, de inteligencia artificial y datos de documentación técnica.

1.5. Metodología de la investigación

La metodología a seguir para la ejecución del proyecto consta de tres fases, las cuales a su vez se despliegan en diferentes etapas.

La primera fase se ha denominado REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y DE LA TÉCNICA: es la más extensa de todas ya que en ella se estructurará toda la fundamentación teórica en la que se basará el desarrollo de los diferentes modelos propuestos en los objetivos y se identificarán trabajos previos con los que se puedan validar los resultados obtenidos con el modelo integrado desarrollado. Las actividades que en ella se realizarán están relacionadas con diferentes aspectos tales como: revisión de bases de datos y de patentes para identificar modelos, equipos y metodologías existentes para la evaluación estructural de componentes de hornos de clinkerización o de elementos de geometrías similares.

La segunda fase denominada DESARROLLO DEL SOFTWARE. Parte de los resultados obtenidos en la primera y comprende etapas más especializadas en las que se pretende ir dando forma a lo que se desea como producto final; esta fase se da en tres etapas: desarrollo del modelo, diseño de la herramienta computacional y programación.

En el desarrollo del modelo se debe identificar cuáles de las teorías disponibles en la mecánica de sólidos resultan útiles para modelar la interacción de los fenómenos estructurales y térmicos presentes en el cuerpo del horno. Adicionalmente, dado que se cuenta con trabajos predecesores desarrollados dentro del grupo de investigación de materiales y procesos, GIMYP, es importante realizar una evaluación de cuál de ellos será tomado como base para el nuevo modelo integrado ya que cada uno de los modelos analíticos con que se cuenta hoy día fueron desarrollados bajo diferentes supuestos y consideraciones, las cuales finalmente terminan influyendo de una u otra forma sobre los resultados del mismo posiblemente alejándolos de lo que sucede en la realidad.

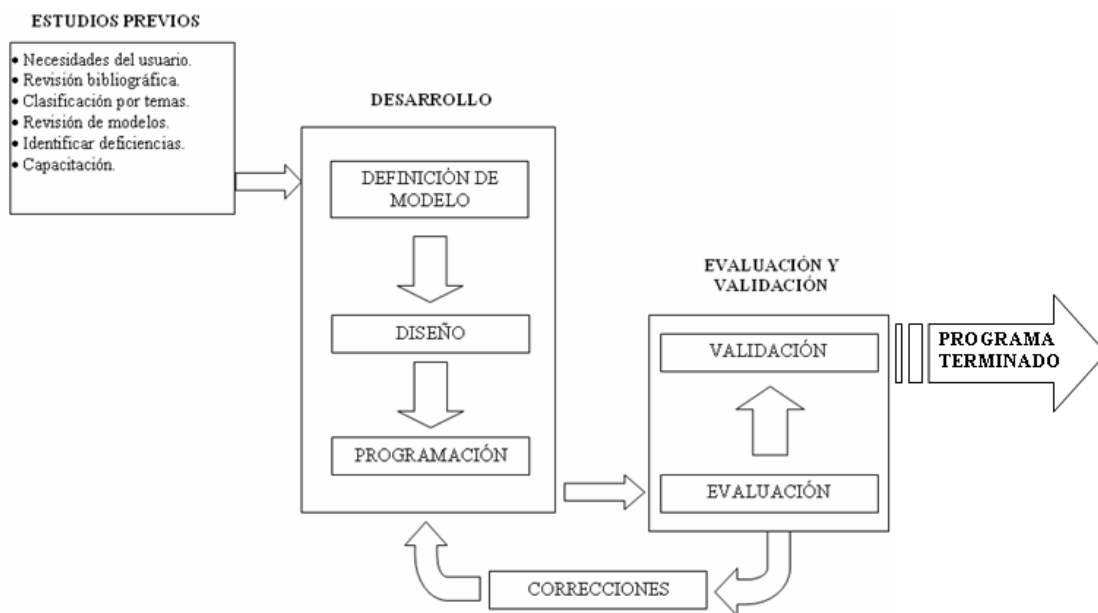
En la etapa de diseño de la herramienta se partirá de la premisa de ser lo más amigables con el usuario, de tal forma que el uso del programa sea lo más intuitivo y práctico posible; se implementarán módulos a modo de ventana para el ingreso de los datos tales como variables geométricas, constitutivas y de operación. Por su parte los resultados se presentarán de forma gráfica sobre un área común y será posible cambiarlos a través de la selección del resultado deseado de una lista desplegable.

Por último en la etapa de programación se desarrollará un algoritmo basado en el modelo integrado en el que partiendo de las variables introducidas por el usuario, el programa estructure un sistema de ecuaciones y a través de diferentes ventanas arroje gráficas y resultados.

En la tercera y última fase denominada de EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN, se realizarán diferentes pruebas al programa para revisar su funcionamiento bajo diferentes condiciones, luego se realizarán corridas cuyos resultados serán comparados con los obtenidos a través de otros modelos, a saber: numéricos, basados en inteligencia artificial y de datos obtenidos de literatura técnica especializada.

A continuación se presenta un esquema en el que se aprecia más claramente la metodología a utilizar:

Figura 1. Esquema de la metodología a utilizar.

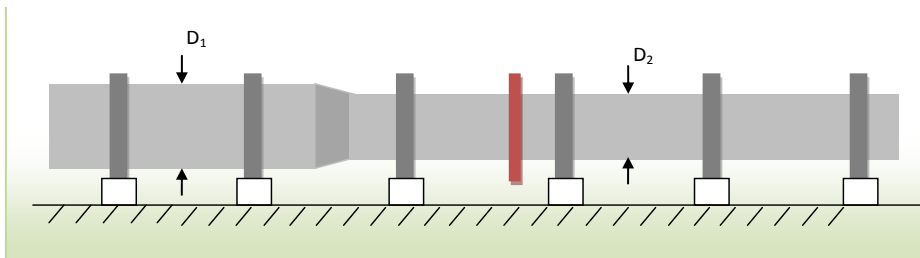


DESARROLLO DEL MODELO INTEGRADO**2.1. Introducción.**

Un horno rotatorio de clinkerización básicamente es una gran estructura tubular cuyos diámetros oscilan entre los 4m a los 7m, sus espesores de pared varían entre 25mm a 31mm en la mayoría del cuerpo del horno y esta soportado por un conjunto de llanta-rodillos donde el espesor de la virola aumenta hasta 70mm. Para propiciar el movimiento del material al interior del horno este cuenta con una ligera inclinación entre el 3% al 4% y gira a velocidades muy bajas 0,8 a 2 RPM.

El material alimentado puede ser pasta o polvo de caliza dependiendo del tipo de proceso utilizado, vía húmeda o seca respectivamente, e ingresa por el extremo más elevado y frío (120°C) avanzando a través de toda la longitud hasta el extremo más caliente (1500°C) donde el quemador está ubicado; en el caso particular del proceso húmedo se cuenta con un sistema de cadenas colgadas al interior del horno muy cerca del extremos de entrada (un diámetro), dicho sistema de cadenas propicia un aumento en la transferencia de calor entre los gases de combustión y la pasta, que en este punto cuenta con un gran contenido de humedad, típicamente 35%. Estructuralmente dichas cadenas representan una carga de 100Ton distribuidas en por lo menos 30metros. Al abandonar el horno, el material la pasta ahora transformada en clínker entra al enfriador donde le es retirado el calor remanente del proceso anterior y se alista para los procesos posteriores.

Figura 2. Configuración típica de un horno rotatorio vía húmeda de diámetro variable



Como se ilustra en la Figura 2 el cuerpo del horno cuenta con unos gruesos anillos de acero, denominados llantas, en múltiples puntos usualmente 3 o 4 para proceso de vía seca y 5 o 6 para vía húmeda; el diámetro interno de las llantas es por lo general 200 a 400mm mayor que el diámetro externo de la virola y van apoyadas sobre una par de rodillos ubicados simétricamente bajo el horno. Figura 3.

Figura 3. Vista general de un conjunto llanta-rodillos.



Las deformaciones máximas experimentadas por la virola del horno ocurren en dos regiones: en los puntos de apoyo donde la sección transversal que idealmente es circular cambia de forma y se convierte en una elipse y entre los soportes donde la sección transversal sufre ligeros cambios pero se experimentan las deflexiones máximas.

Para disminuir las pérdidas de calor por el shell del horno y mantener las temperaturas de operación (hasta 1600°C), el interior del horno es recubierto con un revestimiento refractario cuyo espesor es variable dependiendo de la región del horno en que se encuentre. Adicionalmente, al recubrimiento de ladrillos refractarios, durante la operación se va creando una costra de material; estas dos capas contribuyen no solo al peso muerto soportado por la estructura sino también a su rigidez; en el presente trabajo se despreciará la rigidez aportada por el recubrimiento refractario.

2.1.1. Selección del modelo analítico a implementar.

El horno se modelará como una viga continua de sección transversal anular con área variable; debido a que el número de incógnitas, en este caso reacciones en los apoyos, es mayor al número de ecuaciones se clasifica como un sistema hiperestático o indeterminado, lo cual nos conduce a utilizar métodos alternativos para la evaluación de las reacciones.

Revisando la teoría disponible en la mecánica de sólidos se encuentra que existen diversos métodos disponibles para la solución de este tipo de sistemas, entre los más utilizados se encuentran:

- Método de integración:
- Método Área-Momento
- Método de superposición

Dado que el procedimiento de análisis del Método de integración es fácilmente sistematizable y permite obtener expresiones matemáticas continuas por rangos que describen gráficamente el comportamiento del cortante, flector y de la deformación se optó por implementarlo como principio de operación del programa que se encargará de modelar estructuralmente los hornos.

2.2. Desarrollo del modelo estructural del horno.

Previamente se ha seleccionado el método de integración para desarrollar el modelo estructural. En esta sección se presenta el detalle de cómo se implementó dicho método para el caso particular de los hornos rotatorios.

2.2.1. Seccionamiento del horno en tramos de propiedades y configuraciones homogéneas.

El primer paso para desarrollar el modelo es seccionar el horno en tramos de carga e inercia constantes, para esto se tabulan todas las propiedades y características de los diferentes elementos del horno en los tramos donde estos permanecen constantes. Luego se corre un algoritmo que teniendo en cuenta dicha información consolida una tabla en la que en cada tramo todas las propiedades permanecen invariables:

- Propiedades y configuración del refractario

Al interior del horno se encuentra un revestimiento refractario que protege la virola de las altas temperaturas alcanzadas en el proceso. De acuerdo a la zona del horno, es necesario que los ladrillos posean diferentes características, por lo cual se usan ladrillos de diferentes densidades y espesores.

- Peso del material

El material cuando entra al horno por el extremo de alimentación, posee un grado de humedad cercano al 35% el cual disminuye a lo largo del horno, principalmente en la zona de cadenas, donde los gases calientes evaporan el agua del material. La disminución de densidad en ésta zona del horno se efectúa gradualmente, pero para simplificar el modelo, se consideró como pasos escalón.

- Peso de la virola

La virola es un componente cilíndrico, generalmente fabricado en acero A36, y estructuralmente es el componente mas importantes para el normal funcionamiento del horno. Dadas las dimensiones de este, espesor y diámetros, su propio peso es importante y también se considerará en el análisis. Es importante resaltar que la virola cambia de

espesor a lo largo del horno, principalmente en los apoyos donde el espesor es mayor para soportar las altas cargas de dichas zonas.

- **Peso de las cadenas**

Las cadenas están localizadas cerca al extremo de alimentación del horno y su función es mejorar la transferencia de calor entre los gases calientes y la pasta. A partir del número de cadenas por tramo, el peso de las mismas y la distancia de los tramos se calcula la densidad de carga.

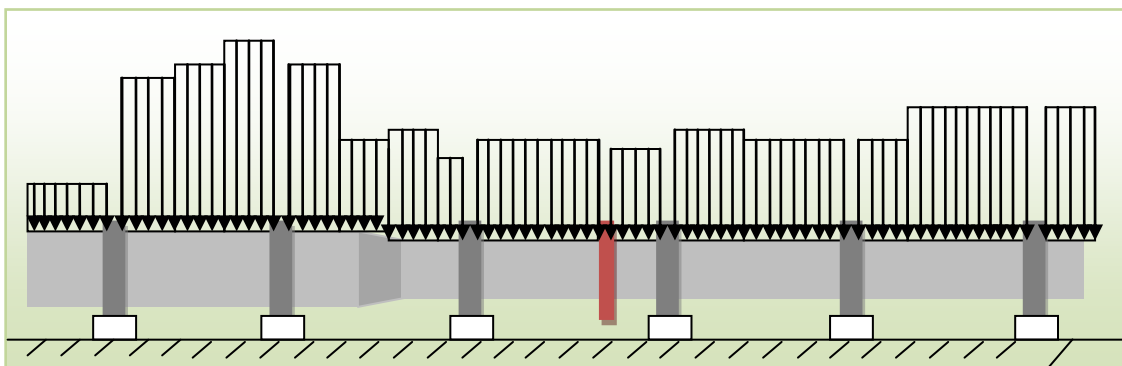
- **Par transmitido y Peso de la corona**

La rotación del horno en estudio se efectúa a través de una corona de accionamiento localizada a 84 metros del extremo de descarga, pesa 14000kg y es soportada por la virola. Esta transmite un par de torsión al horno que se consume en dos aspectos: el par necesario para vencer el rozamiento en las llantas y el par necesario para el movimiento de la virola y la pasta dentro de esta.

Del seccionamiento se obtienen n tramos de carga e inercia constante por lo que la estructura en general lucirá de la siguiente forma:

Para cada tramo existirá una carga y una inercia constante a lo largo de dicho tramo.

Figura 4. Seccionamiento del horno en tramos de carga e inercia constante.



2.2.2. Determinación de la carga asociada a cada tramo.

Dado que tenemos dividido el horno en tramos de características y configuraciones homogéneas para cada sección podemos plantear las expresiones que representan la distribución lineal de la carga debida a cada uno de los diferentes factores considerados; estas expresiones se presentan a continuación:

- La densidad lineal de carga del refractario correspondiente a cada tramo se calcula de la siguiente forma:

—

- La densidad lineal de carga debida al peso del material para cada tramo se calcula de la siguiente forma:

—

- La densidad lineal de carga debido al peso de la virola para cada tramo se calcula de la siguiente forma:

—

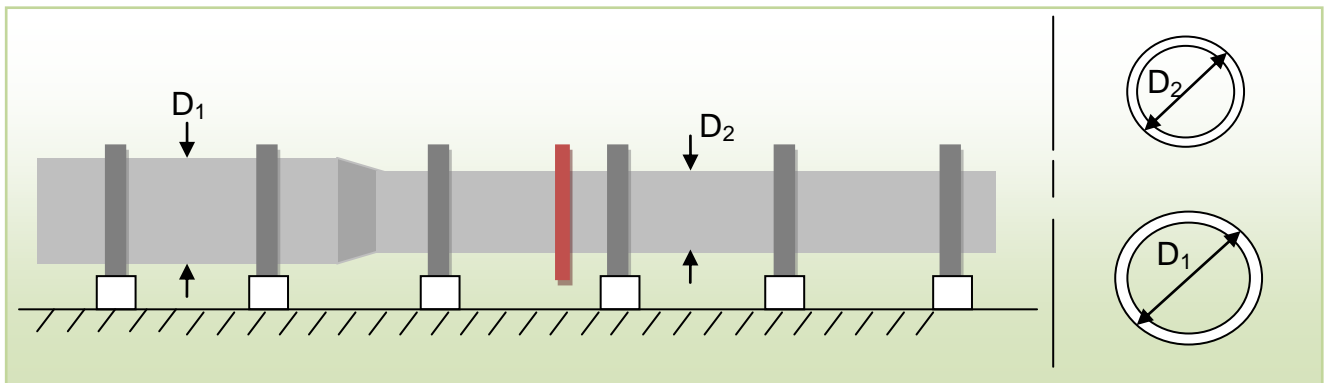
Conociendo las distribuciones de carga de cada uno de los factores considerados (refractario, virola, material y cadenas) se procede a calcular la distribución de carga total del tramo, que equivale a la suma de las cuatro anteriores; para aquellos tramos en los que haya carga debida al peso de las cadenas esta carga también se debe considerar en caso contrario será cero.

2.2.3. Determinación de la inercia asociada a cada tramo.

Típicamente los hornos de clinkerización presentan dos diámetros a lo largo de toda su longitud, uno mayor hacia la entrada de pasta y uno menor hacia la entrada de gases calientes, el cambio de diámetro se da en un cono que tiene una longitud no mayor de dos metros el cual se encuentra ubicado a 36 o 37 metros de la entrada de pasta.

Se debe recordar que se está analizando el comportamiento estructural de una viga de sección anular de área variable, lo cual supone un cambio de inercia para los diferentes diámetros y espesores.

Figura 5. Cambio de inercias debida al cambio de diámetros



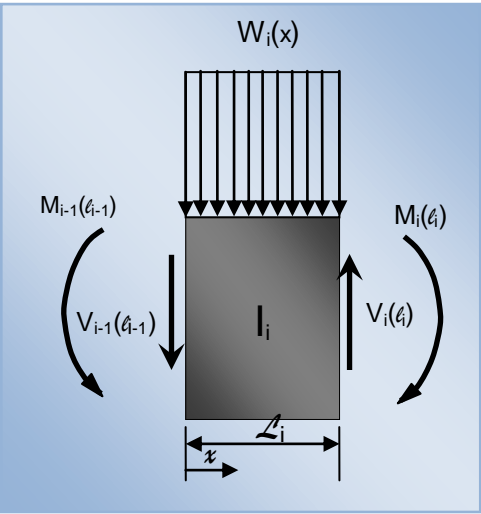
La fórmula utilizada para determinar la inercia de cada sección es la que se presenta a continuación:

—

2.2.4. Montaje de las ecuaciones de cortante, flector, elástica y deformación para cada tramo.

Teniendo todo el horno seccionado por tramos y habiendo determinado la carga y la inercia asociada a cada uno de ellos podemos proceder a montar las ecuaciones que representan el cortante, el momento flector, la tangente de la elástica y la curva de la deformación para cada tramo.

En general presentaremos el caso para un tramo i en algún punto intermedio del horno en el que no actúan cargas puntuales tales como las reacciones de los apoyos o el peso de la corona.



El tramo de estudio se presenta con inclinación cero grados para simplificar el análisis, en etapas posteriores las fuerzas axiales producto de la inclinación del horno serán consideradas. Este enfoque es valido dado que el horno trabajo dentro del rango elástico y el sistema es lineal.

Las ecuaciones uno a cuatro corresponden a un tramo libre de cargas puntuales, tales como las reacciones de los apoyos o peso de la corona. Para aquellos tramos en los que si se presenten dichas fuerzas entonces se deberán incluir en la ecuación correspondiente a cortante.

Ec. 1

—

Ec. 2

— — —

Ec. 3

— — —

Ec. 4

2.2.5. Determinación del valor de las reacciones y de las constantes de integración.

Tal como se apreció en la sección anterior durante el armado de las ecuaciones de la tangente de la elástica y de la curva de desplazamientos se generan 2 constantes de integración por cada uno de los n tramos del horno, adicionalmente tenemos que el horno está apoyado sobre un número N de llantas de las que nos interesa conocer las reacciones; por lo tanto luego de armar las ecuaciones para cada uno de los tramos se generarán $2n + N$ incógnitas que debemos determinar, para esto debemos identificar cuáles son las $2n + N$ ecuaciones que serán utilizadas para de forma matricial resolver el problema.

Se cuenta con ecuaciones provenientes de diferentes fuentes tales como:

- Sumatorias de fuerzas (1)
- Sumatorias de momentos (1)
- Continuidad (2n-2)
- Condiciones de frontera (N)

Durante el montaje de los hornos existen desviaciones en la posición de los rodillos conocidas como desalineamiento, este puede presentarse de dos formas vertical y horizontal. En el caso ideal el desplazamiento de la virola sobre el eje y es nulo en los apoyos, por lo tanto para los N tramos en los que estos se encuentran se cumpliría que:

Donde k es el número de tramos en los que existen apoyos.

Dado que el modelo debe ser capaz de incluir el desalineamiento vertical de los rodillos; se propone asumir que la virola siempre seguirá a los rodillos permaneciendo en contacto con estos, lo anterior significa que se desplazará una magnitud igual al desalineamiento de los rodillos, por lo tanto el valor del desplazamiento en los apoyos será igual al valor del desalineamiento ingresado por el usuario. En su forma más general esto es:

Al lado del nombre de cada tipo de ecuación entre paréntesis se presenta cuantas aporta al sistema de ecuaciones; se observa que la sumatoria de ellas corresponde al número de incógnitas, lo cual indica que el sistema es determinado y siempre será posible representarlo de la forma:

$$\begin{array}{cc}
 \left. \begin{array}{l} (n-1) \text{ ecuación} \\ \text{continuidad} \\ \text{elastica} \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} (n-1) \text{ ecuación} \\ \text{continuidad} \\ \text{elastica} \end{array} \right\} \\
 \left. \begin{array}{l} (n1) \\ \text{continuidad} \\ \text{deformacion} \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} (n1) \\ \text{continuidad} \\ \text{deformacion} \end{array} \right\} \\
 \left. \begin{array}{l} (2) \text{ equilibrio de} \\ \text{fuerzas y} \\ \text{momentos} \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} (2) \text{ equilibrio de} \\ \text{fuerzas y} \\ \text{momentos} \end{array} \right\} \\
 \left. \begin{array}{l} (N) \\ \text{Condiciones} \\ \text{de frntera} \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} (N) \\ \text{Condiciones} \\ \text{de frontera} \end{array} \right\}
 \end{array}$$

Donde la matriz K corresponderá a los coeficientes de las incógnitas, F será el vector incógnitas y P será los términos constantes de cada una de las ecuaciones.

Al resolver el sistema de ecuaciones se logran determinar todas las constantes de integración y las fuerzas de reacción en los apoyos. Luego, al reemplazarlas en las expresiones de fuerza cortante, momento flector, elástica y desplazamiento de cada tramo (ec 1, ec2, ec3, ec4) es posible conocer la distribución de cada uno de estos a lo largo del horno.

2.3. Evaluación de indicadores estructurales del Shell y de las llantas.

A partir de los resultados de la sección anterior y con la información geométrica del horno se procede a calcular los factores de seguridad estáticos, a fatiga, la vida residual del Shell y la ovalidad de las llantas.

A continuación se describen las ecuaciones utilizadas para calcular cada uno de los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los componentes del horno:

2.3.1. Cálculo de los esfuerzos en el Shell.

Esfuerzos cortantes:

Los esfuerzos cortantes estarán determinados por una expresión en función de la fuerza cortante, el radio externo y el área de la sección transversal presentes a lo largo de cada tramo del horno, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{V}{A} \cdot \frac{r}{2}$$

Dado que el área transversal del horno siempre será una sección anular es posible simplificar esta expresión.

$$\tau = \frac{V}{A} \cdot \frac{r}{2}$$

Donde:

$$\tau = \frac{V}{A} \cdot \frac{r}{2}$$

$$\tau = \frac{V}{A} \cdot \frac{r}{2}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$\tau = \frac{V}{A} \cdot \frac{r}{2}$$

Reemplazando e en la fórmula de los esfuerzos cortantes y simplificando se obtiene la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{V}{I} \frac{y}{h}$$

Donde:

τ : es la distribución de fuerzas cortantes a lo largo de un tramo.

y : es el diámetro externo de la virola.

h : es el diámetro interno de la virola.

Esfuerzos flectores:

Los esfuerzos flectores serán iguales a:

$$M = \frac{P}{2} \frac{y}{h}$$

Particularizando para la sección anular del horno se obtiene:

$$M = \frac{P}{2} \frac{y}{h}$$

Donde:

M : es la distribución de momentos flectores a lo largo de un tramo.

y : es el diámetro externo de la virola.

h : es el diámetro interno de la virola.

Esfuerzos torsores:

Los esfuerzos cortantes torsores serán iguales a:

$$\tau = \frac{V}{I} \frac{y}{h}$$

Particularizando para una sección transversal anular como la del horno se obtiene:

$$\tau = \frac{V}{I} \frac{y}{h}$$

Donde:

τ : es la distribución de momento torsores a lo largo de un tramo.

y : es el diámetro externo de la virola.

h : es el diámetro interno de la virola.

Esfuerzos axiales

Los esfuerzos axiales serán:

Donde:

: es la distribución de fuerzas axiales a lo largo de un tramo.

: es el diámetro externo de la virola.

: es el diámetro interno de la virola.

2.3.2. Determinación de la sección crítica del horno.

A partir de los estados de esfuerzo determinados en la sección anterior es posible identificar, a través del cálculo del esfuerzo equivalente de Von Misses, cual es la sección más solicitada mecánicamente y por donde existe mayor probabilidad de iniciarse una falla en el Shell.

Este cálculo se hizo a lo largo de todo el horno considerando los esfuerzos flector, torsor y axial; cuya combinación es la más perjudicial para el material y se presenta en la fibra más alejada sobre el eje vertical en dirección normal al eje del horno, donde el esfuerzo flector alcanza su valor máximo y se suma con el axial que es constante en toda la sección.

A continuación se presenta la fórmula utilizada para el cálculo de los esfuerzos equivalentes de Von Misses:

Una vez se calcula la expresión de los esfuerzos equivalentes a lo largo de todo el horno la sección crítica se define como aquella donde esta alcanza su valor máximo.

2.3.3. Cálculo del factor de seguridad estático

Una vez identificada la sección crítica del Shell se calculó el factor de seguridad estático en dicho punto a través de la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{lim}}$$

Donde:

corresponde a la posición de la sección crítica.

es el límite elástico del material

El cálculo del factor de seguridad estático es un indicador muy conservador de la integridad estructural del horno, ya que durante la operación este gira sobre su eje generando variaciones cíclicas en los esfuerzos los cuales son mucho más perjudiciales. Por lo anterior se realizó un análisis de cargas variables considerando la fatiga del material.

2.3.4. Cálculo del factor de seguridad a fatiga.

Para el cálculo del factor de seguridad a fatiga del Shell se utilizó el enfoque de Goodman modificado, el cual se presenta a continuación:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_u} + \frac{\sigma_{max}}{\sigma_f} = 1$$

Donde:

$$\sigma_{max}$$

$$\sigma_u$$

Corresponde a la resistencia a la fatiga del material incluyendo el efecto de los factores modificadores según la ecuación de Marín.

Corresponde a la resistencia última del material.

El límite de fatiga es una de las propiedades de los materiales que más se ve influenciada por agentes externos tales como: procesos de fabricación, diseño del componente y condiciones de operación. Marín [22] identificó factores que cuantifican los efectos de la condición superficial, carga, temperatura, tamaño y varios otros puntos; los cuales al ingresarse a la ecuación que se presenta a continuación permite calcular, S_e , el límite de fatiga modificado por los factores previamente explicados.

Para el caso particular del horno el valor de cada uno de estos factores se presenta a continuación:

K_s : 1

K_t : 0,6473

K_c : 1,0069

K_d : 0,753

K_e : 0,6

K_f : 1

De acuerdo a la tabla A-20 del Shigley octava edición la resistencia a la tensión, S_u , del acero AISI/SAE 1040 es: 520MPa.

Sustituyendo los anteriores valores en la ecuación de Marín se obtiene la resistencia a la fatiga modificada para las condiciones del Shell.

2.3.5. Cálculo de la vida residual del Shell para cargas cíclicas:

En caso que el factor de seguridad a fatiga sea menor que uno, la vida del Shell no será infinita sino que estará limitada a un número de ciclos de carga. Esta estimación se realizó de acuerdo a la ecuación de Basquin que se describe a continuación:

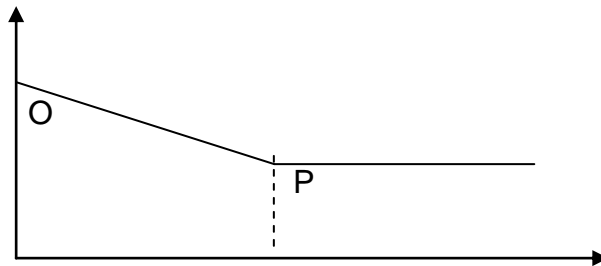
Donde:

Es el esfuerzo reversible aplicado al componente.

Es el número estimado de ciclos de vida.

Son constantes que dependen del material.

Para determinar los factores a y b utilizamos la curva de resistencia a la fatiga del material:



Conociendo el valor de la resistencia última del material y sustituyendo los valores de los puntos O y P en la ecuación de Basquin se obtienen dos ecuaciones para determinar las constantes a y b del material.

Sustituyendo O:

Sustituyendo P:

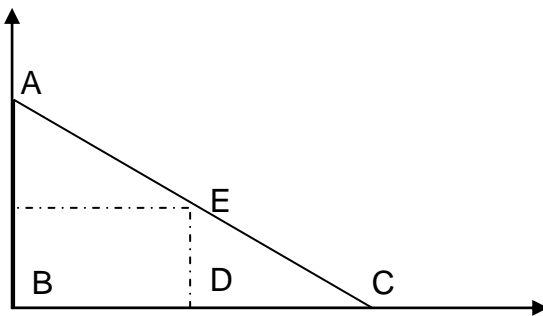
Restando (*) a (**) y simplificando se obtiene:

Sustituyendo b en (*):

De lo anterior si se conoce el límite de resistencia a la fatiga teórico del material y su resistencia última entonces es posible conocer los factores a y b de la ecuación de Basquin.

Respecto al término del esfuerzo aplicado, _____, dado que en el Shell del horno los esfuerzos no son reversibles, _____, entonces es necesario calcular el esfuerzo reversible equivalente (_____) que genere la falla en el mismo número de ciclos que la combinación de los esfuerzos medio y el alternante presentes en el horno; _____ y _____ respectivamente.

Gráficamente esto es posible representarlo mediante la semejanza de triángulos ABC y EDC; según se describe a continuación:



Dado que _____ entonces se tiene que:

2.3.6. Cálculo de la ovalidad de las llantas.

Las llantas o aros de rodadura son de los componentes más importantes para el normal funcionamiento de un horno rotatorio ya que en ellas es donde se transmiten las fuerzas de reacción entre los rodillos de apoyo y la virola. Dada la magnitud de las fuerzas que allí se presentan las dimensiones de los componentes deben ser diseñadas para que los esfuerzos y las deformaciones generadas permanezcan a un nivel tolerable. En estas zonas, la deformación más importante, que se considera desde el diseño y se monitorea durante el funcionamiento es la deformación radial tanto en la virola como en las llantas, mejor conocida como ovalidad.

La ovalidad se constituye en uno de los principales indicadores de salud estructural de las llantas y de la virola ya que representa el grado de deformación radial de estos componentes. La experiencia ha demostrado que dado que la rigidez de las llantas es mayor que la de la virola si se asegura que la primera permanezca en valores tolerables entonces la virola operará en el rango seguro, además para altos valores de deformación radial u ovalidad se presenta desprendimiento de la capa de ladrillos refractarios, dejando desnuda la lamina del Shell a las altas temperaturas del interior del horno posibilitando un rompimiento de esta y la salida de funcionamiento del equipo.

La ovalidad del aro de rodadura o llanta puede calcularse de una forma aproximada mediante la formula de Nies, que nos da una estimación de la deformación máxima del aro de rodadura:

—

Siendo:

Fuerza de reacción en la llanta. [kg]

: Radio medio [mm]

Módulo de Young

Momento de inercia. [mm⁴]

En el caso de un aro de rodadura rectangular de anchura b(mm) y espesor h(mm) se tiene: —

De donde:

—

Según Nies, la ovalidad y la deformación máxima están relacionadas del modo siguiente:

—

Resultados y Análisis de Resultados

3.1. Datos de entrada del modelo.

Como caso de estudio se analizó un horno rotatorio de clinkerización por vía húmeda, los datos de dicho equipo fueron suministrados por una empresa cementera de la industria local y se presentan a continuación, en general las tablas siempre indicarán la posición inicial y final del tramo (medidas desde el extremo de descarga) y el valor de la característica o propiedad.

Distribución de los apoyos y características de las llantas o aros de rodadura:

El horno a analizar es un horno de 6 apoyos y se consideró que ninguno presentaba desalineamiento vertical, a continuación los datos del horno caso de estudio:

Tabla 1 Ubicación de los apoyos y características de las llantas.

	metros	Desalineami	Ancho	Espesor	Diam Ext
Tramo # 1	4	0	457	350	4508
Tramo # 2	25	0	609	350	4584
Tramo # 3	51	0	609	350	4546
Tramo # 4	80	0	609	350	4546
Tramo # 5	104	0	609	400	5029
Tramo # 6	128	0	609	400	5029

Ubicación de los apoyos en metros; ancho, espesor y diámetro exterior de los aros de rodadura en milímetros.

Diámetros externos de la virola o Shell:

El horno objeto de estudio presenta dos diámetros en toda su longitud, dado que el detalle de la transición entre ellos no representa un valor agregado significativo se considerará como un paso escalón, a continuación se tabulan los valores

Tabla 2 Diámetros del horno

	Inicio	Final	Diametro
Tramo # 1	0	90	4
Tramo # 2	90	137	4.3

Distancias y diámetros en metros.

Espesor de la virola o Shell.

La virola del horno objeto de estudio está reforzada en las zonas de los apoyos, y la transición entre las zonas de mayor a las de menor espesor se detallan en el análisis, a continuación se tabulan los valores de estos a lo largo del horno:

Tabla 3 Espesores del Shell o virola.

	Inicio	Final	Espesor
Tramo # 1	0	3	0.0381
Tramo # 2	3	5	0.05715
Tramo # 3	4	7	0.0381
Tramo # 4	7	22	0.0286
Tramo # 5	22	24	0.0381
Tramo # 6	24	26	0.05715
Tramo # 7	26	28	0.0381
Tramo # 8	28	48	0.0222
Tramo # 9	48	50	0.0381
Tramo # 10	50	52	0.05715
Tramo # 11	52	54	0.0381
Tramo # 12	54	77	0.0222
Tramo # 13	77	81	0.038
Tramo # 14	81	82	0.05715
Tramo # 15	82	85	0.038
Tramo # 16	85	96	0.0222
Tramo # 17	96	100	0.0222
Tramo # 18	100	101	0.0222
Tramo # 19	101	103	0.038
Tramo # 20	103	105	0.05715
Tramo # 21	105	107	0.038
Tramo # 22	107	125	0.0222
Tramo # 23	125	127	0.038
Tramo # 24	127	129	0.05715
Tramo # 25	129	130	0.038
Tramo # 26	130	137	0.0222

Distancias y espesor en metros.

Características y propiedades del refractario:

El refractario tiene dos características que son importantes para el estudio estructural, el espesor y la densidad. A continuación se presentan dichos valores para el horno caso de estudio:

Tabla 4 Densidad de refractarios

	Inicio	Final	Densidad
Tramo # 1	0	38	2600
Tramo # 2	38	73	3000
Tramo # 3	73	92	3300
Tramo # 4	92	137	3000

Distancias en metros y densidad en kg/m^3 .

Tabla 5 Espesor del refractario

	Inicio	Final	Espesor
Tramo # 1	0	80	0.2286
Tramo # 2	80	107	0.1524
Tramo # 3	107	137	0.1016

Distancias y espesores en metros.

Zona de cadenas:

Dado que el horno analizado corresponde a un proceso por vía húmeda este cuenta con una zona de cadenas, a continuación se presentan los tramos de carga de cadena constantes:

Tabla 6 Zona de carga de cadenas constantes

	Inicio	Final	Carga
Tramo # 1	0	101	0
Tramo # 2	101	106	25124
Tramo # 3	106	109	25288
Tramo # 4	109	113	23527
Tramo # 5	113	128	40000
Tramo # 6	128	132	45403
Tramo # 7	132	137	0

Distancias en metros y densidad lineal de carga en N/m .

Según se observa en la tabla, desde el extremo de alimentación los primeros cinco metros no tienen cadenas, esto es común observarlo en este tipo de hornos ya que se utiliza para que se precipiten los finos.

Propiedades de la pasta:

Al interior del horno fluye la pasta de caliza que se va transformando en clinker, producto de estas transformaciones la densidad de la misma va disminuyendo. El cambio más representativo se observa en la zona de cadenas donde se retira el contenido de humedad.

A continuación se presentan los valores de la densidad de la pasta:

Tabla 7 Densidad de la pasta

	Inicio	Final	Densidad
Tramo # 1	0	11	1400
Tramo # 2	11	40	1400
Tramo # 3	40	73	1400
Tramo # 4	73	92	1700
Tramo # 5	92	137	1700

Distancias en metros y densidad en kg/m^3 .

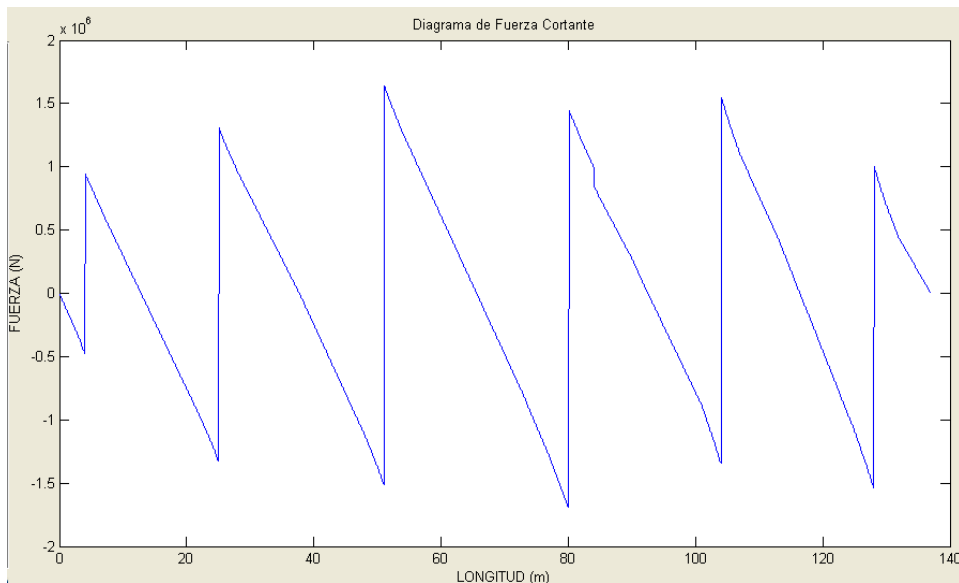
3.2. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos del programa para los datos descritos anteriormente:

Fuerza cortante

El primer diagrama que se puede visualizar es el de fuerza cortante a lo largo del horno:

Figura 7. Diagrama de fuerza cortante



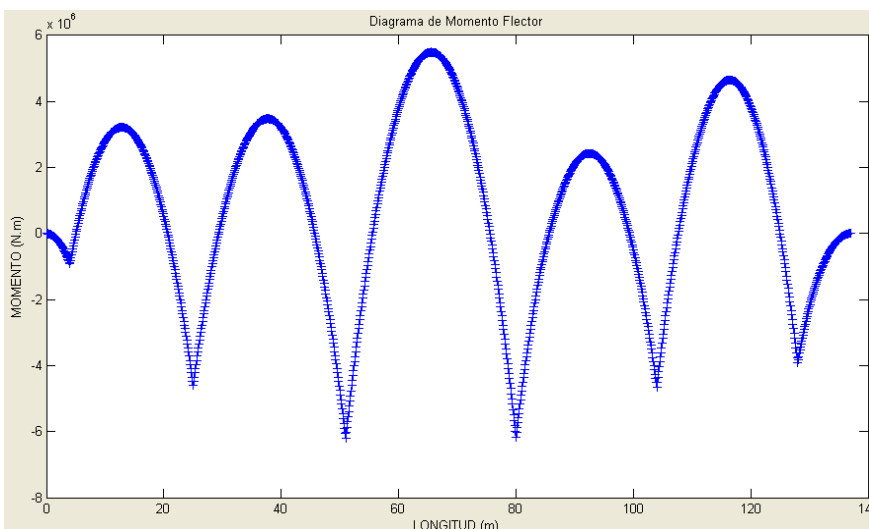
Se observa que la gráfica inicia en cero y termina en cero, lo cual satisface que el sistema esté en equilibrio.

Los saltos que se observan en la gráfica corresponden a las fuerzas de reacción de los apoyos, en el metro 84 se observa el salto correspondiente al peso de la corona.

Diagrama de momentos flectores

A continuación se presenta el diagrama de momentos flectores a lo largo del horno:

Figura 8 Diagrama de momentos flectores



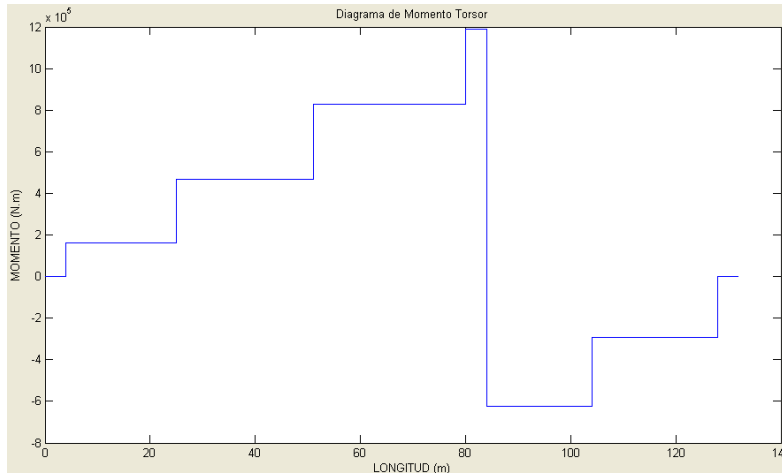
Se observa que el diagrama de momentos flectores inicia en cero y cierra en cero, lo que satisface el equilibrio del sistema.

El momento flector máximo se localiza en el metro 50 con un valor de 6.3×10^6 N.m.

Diagrama de Momentos torsores

A continuación se presenta el diagrama de momentos de torsión a lo largo del horno:

Figura 9 Diagrama de momentos de torsión a lo largo del horno.



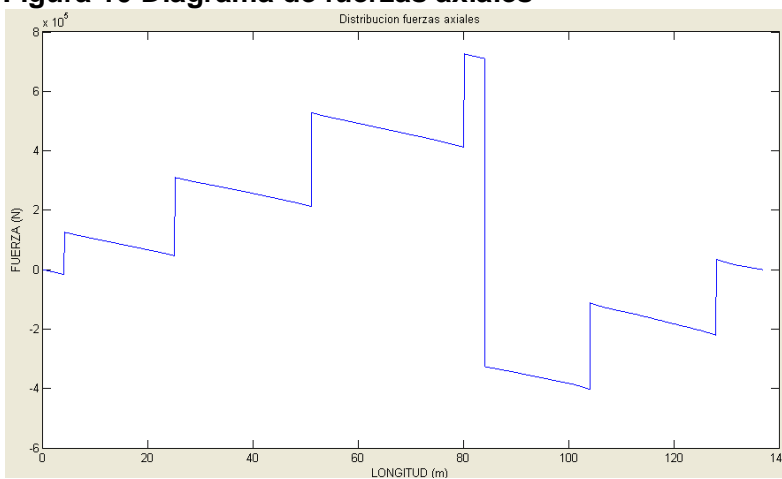
En la gráfica se observa un gran salto en el metro 84, este se debe al par transmitido por la corona. Los saltos más pequeños corresponden al par generado por la fuerza de fricción y resistencia a la rodadura entre los aros de rodadura y los rodillos de apoyo.

El máximo par de torsión de la gráfica es $12 \times 10^5 \text{ N.m}$.

Diagrama de Fuerzas Axiales

A continuación se presenta el diagrama de fuerzas axiales a lo largo del horno:

Figura 10 Diagrama de fuerzas axiales



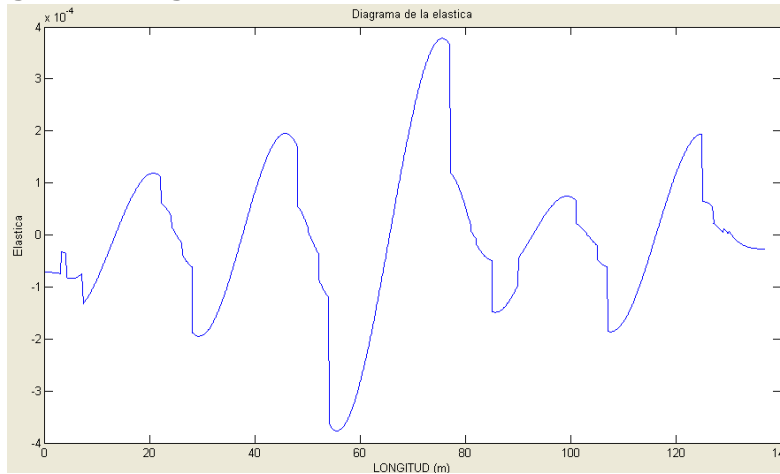
En el diagrama se observa un gran salto en el metro 84, este corresponde a la fuerza de reacción del único apoyo axial del horno. Al lado izquierdo de este salto el horno se encuentra a compresión mientras que del lado izquierdo a tensión.

El salto en los apoyos corresponde a la fuerza de fricción en los aros de rodadura.

Diagrama de la elástica

A continuación se presenta el diagrama de la elástica, que representa la pendiente de la curva de desplazamientos.

Figura 11 Diagrama de la elástica.

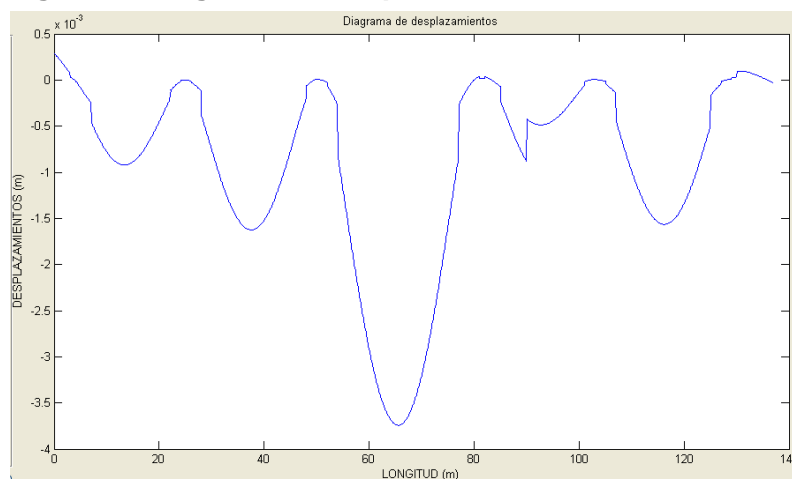


El signo de los valores que se observan corrobora que los resultados obtenidos corresponden al comportamiento que se presentan en la realidad, ya que al inicio de las luces entre apoyos la pendiente es negativa mientras que al final de estos es positiva.

Diagrama de desplazamientos

A continuación se presentan los desplazamientos a lo largo del horno.

Figura 12 Diagrama de desplazamientos en el horno.



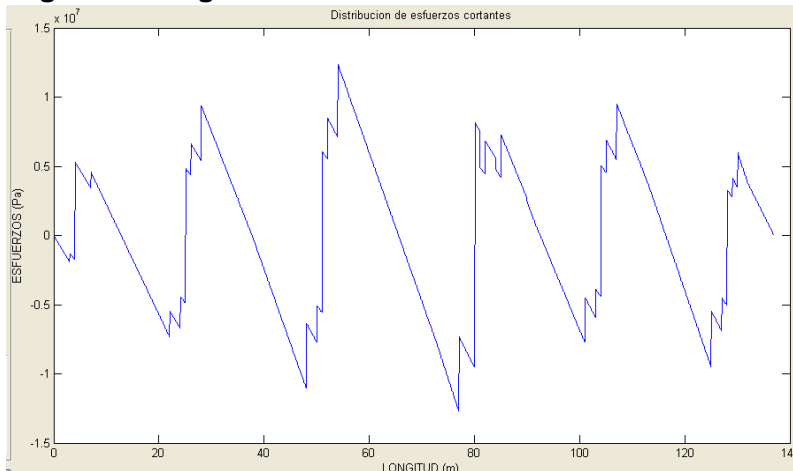
Según se observa en la gráfica el mayor desplazamiento se presenta entre la llanta 3 y 4 (metro 65) y corresponde a 3,7mm.

Este resultado coincide con el hecho de que estas son las llantas o apoyos mas distanciados en el horno.

Diagrama de esfuerzos cortantes

A continuación se presenta el diagrama de esfuerzos cortantes del horno:

Figura 13 Diagrama de esfuerzos cortantes



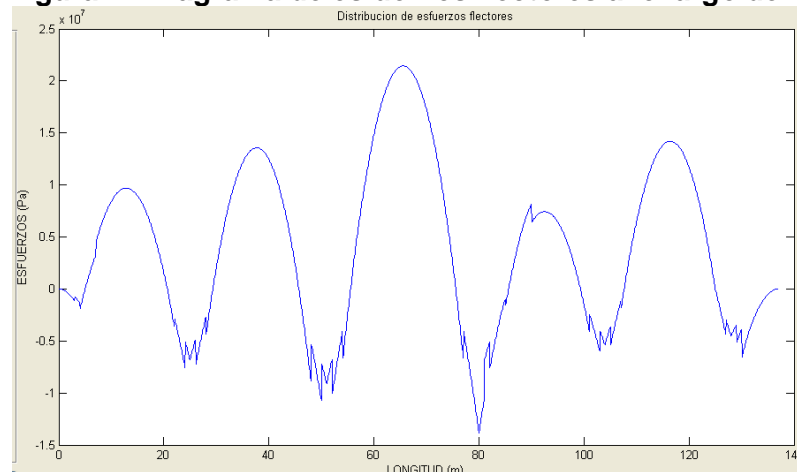
Se observa que la gráfica de los esfuerzos cortantes es muy similar a las de las fuerzas cortantes, las irregularidades cercanas a los saltos de los apoyos se deben a los cambios de espesor de la virola.

El esfuerzo cortante más alto se observa cercano al metro 51 y 80 con un valor de 13MPa.

Diagrama de esfuerzos flectores

A continuación se presenta la gráfica de los esfuerzos flectores a lo largo del horno:

Figura 14 Diagrama de esfuerzos flectores a lo largo del horno.



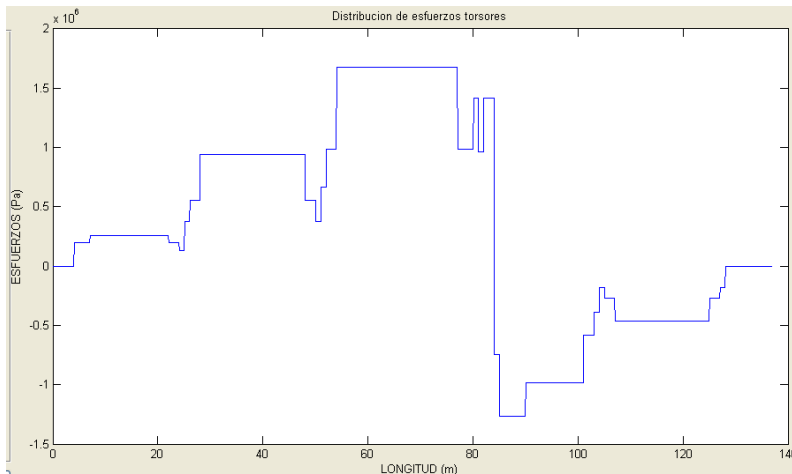
El diagrama de esfuerzos flectores tiene una forma muy similar a la de momentos flectores con pequeñas irregularidades en las zonas cercanas a los apoyos por los cambios de espesor de la virola o Shell. Igualmente en el metro 84 se observa un salto que corresponde a la carga puntual de la corona.

En la gráfica se observa que el esfuerzo flector máximo se localiza en el metro 64 que corresponde al centro de la luz entre los apoyos 3 y 4 con un valor de 22 MPa.

Diagrama de esfuerzos por torsión

A continuación se presenta el diagrama de esfuerzos torsores a lo largo del horno:

Figura 15 Diagrama de esfuerzos por torsión

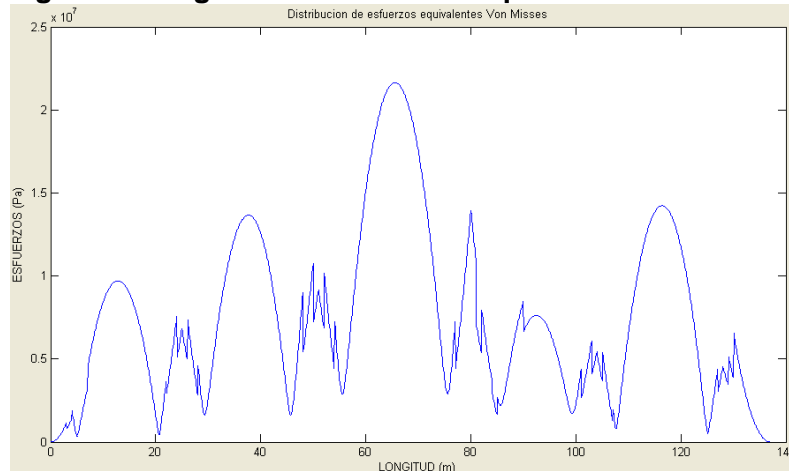


En la gráfica se observa la distribución de los esfuerzos por torsión a lo largo del horno, similar a los diagramas anteriores se presentan pequeños saltos en los cambios de espesor de la virola en las zonas cercanas a los apoyos.

Diagrama de esfuerzos equivalentes de Von Misses

Para determinar la sección crítica del horno se calcularon los esfuerzos equivalentes de Von Misses en toda la longitud. A continuación se presenta la gráfica resultante:

Figura 16 Diagrama de esfuerzos equivalente de Von Misses.



En la gráfica se observa que la combinación de esfuerzos más alta se presenta cercanas al metro 65, donde alcanza un valor de 21MPa.

Igual que en los otros diagramas se observan saltos en la zona de los apoyos por los cambios de espesor de la virola.

Resultados de evaluación de indicadores estructurales del Shell y de las llantas.

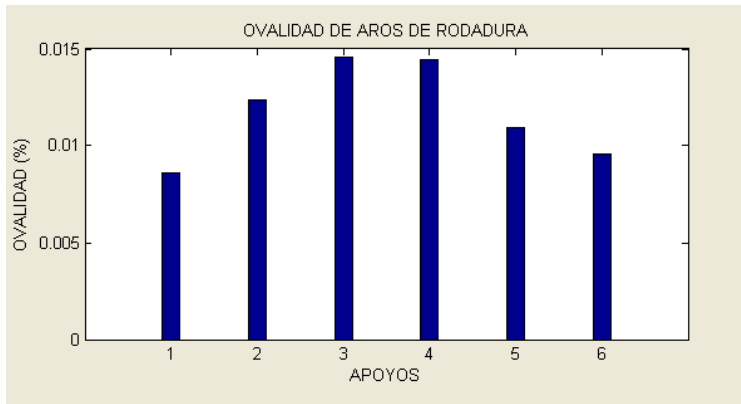
Según el procedimiento descrito en las secciones 2.3.4 a 2.3.6 se calculó el factor de seguridad a fatiga, los ciclos a la falla y la ovalidad en los apoyos. A continuación se presentan los resultados por componente:

Figura 17 Indicadores de integridad estructural del Shell

Estimacion de la vida del shell	
Sección crítica:	metro 65.6
FS a fatiga:	3.50006
Ciclos a la falla:	Vida Infinita

Según se observa en la figura 17 la sección crítica se localiza en el metro 65.6 con un factor de seguridad a fatiga de 3.5, por lo que se considera que la vida es infinita.

Figura 18 Indicadores de integridad estructural de los apoyos



La gráfica de barras de la izquierda, figura 18, presenta la ovalidad en los 6 aros de rodadura de los apoyos del horno. El valor máximo está en los apoyos 3 y 4 con un valor cercano al 0,015%.

3.3. Análisis de resultados.

Los resultados obtenidos con el modelo analítico fueron comparados con los de un estudio realizado en Teherán [10] con un modelo híbrido de elementos finitos (FEM) y redes neuronales artificiales (ANN) a un horno rotatorio de cemento. En dicho modelo estructural se incluyó la rigidez que aporta el refractario a la carcasa, se compararon los resultados del FEM y de la ANN y también se tabularon los tiempos de ingreso de información, modelización y procesamiento para cada uno de ellos, lo anterior permitió comparar el modelo analítico propuesto contra estos en dichos términos.

El artículo en mención estudia un horno de cemento con las siguientes características: Proceso por vía seca, Tres apoyos, 71 metros de largo, 4.8 metros de diámetro, 4% de pendiente.

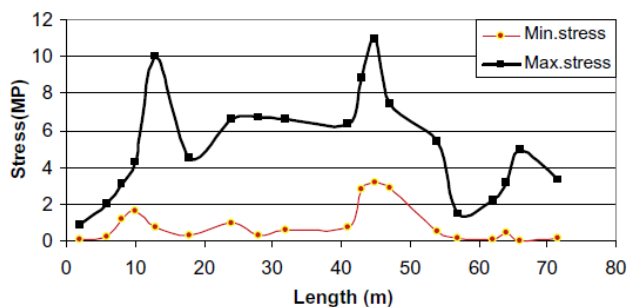
Las cargas consideradas corresponden a: la virola, el material y el refractario. En el artículo se presenta parcialmente la tabla de valores de dichas cargas por secciones, tal como se observa a continuación:

Tabla 8 Información de horno analizado con modelo híbrido.

Region	From (mm)	To (mm)	Coating PRESENCE	Sheet thickness (mm)	Refractory thickness (mm)	Lining thickness (mm)	Material load (N/mm)
1	–	1000		28	250		4900
2	1000	2000		28	250		4900
3	2000	5000		28	250		4900
4	5000	6000		28	250		4900
5	6000	7000		28	250		4900
6	7000	8000		28	250		4900
7	8000	10,000		50	250		4900
8	10,000	10,600		65	250		4900
9	10,600	11,440		65	250		4900

A continuación se presentan los resultados obtenidos en dicho estudio:

Figura 19 Esfuerzos de Von Misses modelo híbrido



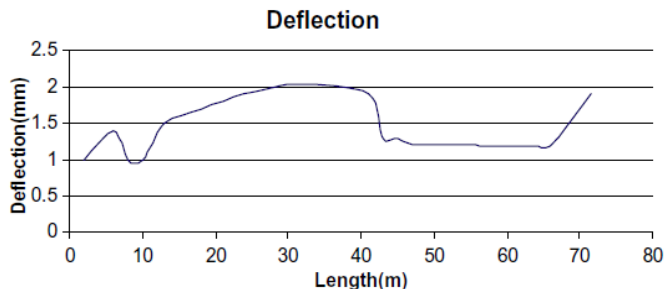
En la figura 19 se presenta la distribución de los esfuerzos de Von Misses a lo largo del horno.

Las cargas consideradas, sus magnitudes y la geometría de los hornos son similares en ambos análisis, la principal diferencia es la longitud total y

la cantidad de apoyos de los hornos. A pesar de esto, es posible analizar secciones similares de ambos hornos, como se describe a continuación:

- En el horno del modelo analítico los apoyos entre la llanta III (metro 30) y llanta IV (metro 81) la luz entre apoyos es 31 metros así como en el modelo híbrido que entre la llanta I (metro 10) y llanta II (metro 42) hay 32 metros. Para estas secciones se observa que los esfuerzos equivalentes de von mises en los apoyos para ambos modelos están cercanos a 10MPa, ver figuras 16 y 19, por su parte los esfuerzos en la zona entre apoyos difieren significativamente, mientras en el analítico alcanzan los 20MPa. en el híbrido permanecen en 7MPa. Esta diferencia se puede explicar por la consideración del aporte de rigidez del refractario a la virola del modelo híbrido. No obstante, cuando se es fabricante de equipos, conviene ser conservador al respecto porque las calidades y espesores del refractario dependen de las características del material a producir y estas, cambian mucho durante la larga vida de estos equipos.
- En el modelo analítico entre la llanta IV y V la distancia entre apoyos es de 23 metros y en el horno del modelo híbrido la distancia entre el apoyo II y III es de 22 metros. En estas secciones se puede observar que en los apoyos al final de la luz de 23 y 22 metros respectivamente los esfuerzos equivalentes de Von Mises están alrededor de 5MPa.

Figura 20 Diagrama de desplazamientos modelo híbrido



En la figura 20 se presenta el diagrama de desplazamientos del horno analizado con el modelo híbrido, se observa que la mayor deflexión se localiza en la luz entre el apoyo I y II, precisamente donde la luz es mayor.

Análogamente en el diagrama de desplazamientos del modelo analítico se observa el mismo comportamiento entre el apoyo III y IV. Existe una diferencia en las magnitudes de los desplazamientos, 2.1 modelo híbrido y 3.5 modelo analítico, pero estos deben relacionarse con la inclusión de la rigidez del refractario a la del Shell en el modelo híbrido.

Un factor común entre los diferentes estudios que existen de modelamiento estructural de horno rotatorios [9, 11, 14, 15] es el interés de ofrecer a la industria una herramienta de evaluación que sea rápida y precisa. Muestra de lo anterior se presenta en la siguiente tabla donde se comparan los

tiempos necesarios para obtener los resultados por el modelo de elementos finitos y el de redes neuronales artificiales.

Figura 21 Comparación de tiempos modelo híbrido

Description	FEM	ANN
Time of modeling	120–140 h	20–60 h
Time of running	1–3 h	0.0003–0.0005 h
Time of new modelling with variation in ring	1–2 h	0.06–0.09 h

Se puede concluir de la tabla que el modelo obtenido por las redes neuronales artificiales brinda menores tiempos de respuesta, siendo lo mas demorado la modelación con un mínimo de 20 horas. Por su parte el modelo analítico dado que está totalmente expresado en término de variables, que estas se ingresan a través de ventanas y que el método de cálculo no demanda muchos recursos informáticos; los tiempos de simulación y corridas se reducen básicamente al tiempo requerido para ingresar la información. Para el caso del estudio presentado en este trabajo ese tiempo fue de 1 hora.

CAPÍTULO IV

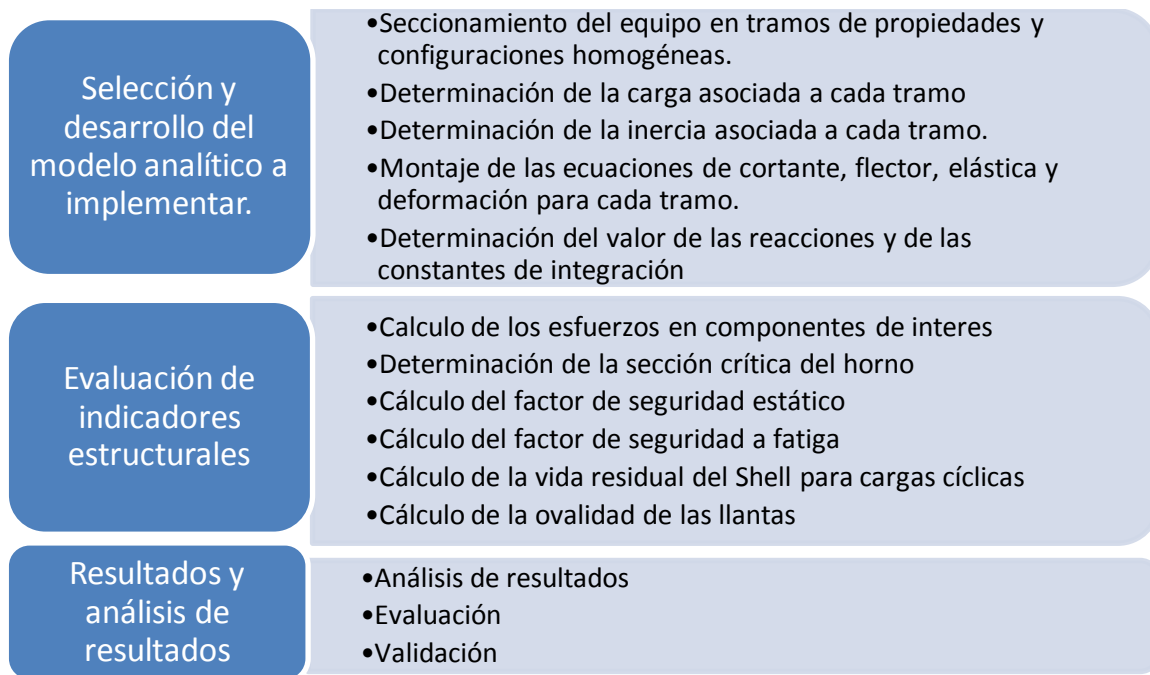
Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se presentó el desarrollo de un modelo analítico para la evaluación de indicadores estructurales de dos de los componentes críticos de los hornos rotatorios, el Shell y los aros de rodadura. La culminación de este trabajo con los resultados obtenidos supone el cumplimiento de todos los objetivos propuestos desde la formulación del mismo. Uno de los impactos más importantes es que se brinda a las empresas una herramienta que de forma rápida y confiable les permite conocer el estado estructural de los componentes críticos de sus hornos rotatorios, facultándolos para la toma objetiva de decisiones tanto de mantenimiento como de operación.

Acerca de los resultados que arroja el modelo se evidenció que estos se ajustan bastante bien al comportamiento real de dichos equipos. Las magnitudes de las variables graficadas en los diferentes diagramas no dan indicio de comportamientos por fuera de lo esperado, por ejemplo era de esperarse que el factor de seguridad a fatiga del Shell fuera mayor que uno, las deformaciones entre apoyos y en los extremos presentan valores dentro del rango de lo que se observa en las operaciones reales. Respecto a la ovalidad de los aros de rodadura los valores obtenidos permanecen en el rango seguro, lo cual refuerza lo evidenciado en el horno caso de estudio que lleva operado por lo menos 20 años.

Un aporte importante del trabajo, es la metodología planteada para el desarrollo de la investigación, la cual es un referente para cualquier trabajo de investigación y/o desarrollo que persiga obtener un modelo de evaluación de integridad estructural de grandes maquinarias y equipos rotatorios de producción, por tanto es necesario que la metodología vincule las siguientes fases:



Durante el desarrollo del modelo y su programación se presentaron diferentes retos que debieron ser sorteados y se convirtieron en un valor agregado de este trabajo frente a otros, de cara al sector productivo:

- El modelo debía ser programable. Este punto fue resuelto mediante la implementación del método de integración sucesiva como principio de operación y desarrollando un prototipo informático bajo la plataforma de programación de MATLAB e interfaces amigables a través del módulo de GUI's.
- Era altamente deseable por la industria que el modelo incluyera desalineamientos verticales en los apoyos. Para incluir este punto se asumió que el tubo o cuerpo siempre se mantiene íntimamente unido a los rodillos de apoyo, cumpliéndose lo anterior entonces las condiciones de frontera deben corresponder al desalineamiento ingresado por el usuario.

RECOMENDACIONES

El modelo desarrollado presenta algunas limitantes que se plantea sean abordadas en trabajo futuros:

- La influencia de la temperatura en el comportamiento estructural del horno no fue considerada. Este factor afecta en dos sentidos: disminuye el módulo de young del material y genera deformaciones tanto radiales como longitudinales.
- No se incluyó el efecto de rigidizado que produce el refractario sobre el cuerpo del horno. En el análisis de resultados se plantea que una de las diferencias entre los diagramas de desplazamiento comparados se debe a la rigidez que aporta el refractario al Shell.
- Aunque el programa permite evaluar la ovalidad del horno, conviene superponer en las zonas de apoyo los esfuerzos derivados de dicha ovalización a los otros esfuerzos actuantes en estas zonas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] GEBHART, W.M (1992), *Patente N° 5,148,238. Ontario, Canadá.*
- [2] GEBHART, W.M (1992), *Patente N° 5,146,795. Ontario, Canadá.*
- [3] PRZEWALSKI, Z.J. (1998), *Patente N°4,776,788.Connecticut.*
- [4] MATHEWS, C.A.; GILLIES, G.M. (1985), *Patente N° 4,553,319. Warrington, England.*
- [5] MALAK, S.P.(1985), *Patente N°4,518,855. Milwaukee, Wis.*
- [6] HACCOURT, J.P.; RICHELLE, R.R.; BAULETT, J.D.W. (1977), *Patente N° 4,056,349. Belgium.*
- [7] KEMNITZ, R.H. (1965), *Patente N° 3,188,155. Milwaukee, Wis.*
- [8] KAREBY, E.H.; (1954), *Patente N° 2,676,867. Stockholm.*
- [9] PAZAND, K.; SHARIAT PANAH, M.; POURABDOLI, M. *Simulating the mechanical behavior of a rotary cement kiln using artificial neural networks. En: Materials and design 2009, p. 3468-3473.*
- [10] SAXENA, A.; ASHRAF, S. *Evolving an artificial neural network classifier for condition monitoring of rotating mechanical system. En: Applied Soft Computin 2007, p. 441-454.*
- [11]. DEL COZ DIAZ, J.J; RODRIGUEZ MAZON, F.;GARCIA NIETO, P.J.; SUAREZ DOMINGUEZ, F.J. *Design and finite element analysis of a wet cycle cement rotary kiln. En: Finite elements in analysis and design. (2002), p. 17-42.*
- [12] LUNA, D.; GONZALEZ, A.; GORDON, M.; MARTIN, N.*Obtención del carbón activado a partir de la cáscara de coco. UAM-Iztapalapa, Depto. Química. 2007.*
- [13] RAJAKARUNAKARAN, S.; VENKUMAR, P.; DEVARAJ, D.; SURYA PRAKASA RAO, K. *Artificial neural network approach for fault detection in rotary system. En: Applied soft computing 2008, p. 740-748.*
- [14] SHUBIN, V.I. *Mechanical effects on the lining of rotary cement kilns. En: Refractories and industrial ceramics, Vol. 42 (2001), p. 41-48.*
- [15] DALELA, G.C; GOYAL, R.; KUMAR, K. *Mechanical stability of cement rotary kilns to prevent brick lining failure.*
- [16] WALTER, M. *Kiln alignment and shell ovality: a new approach. Phillips Kiln Service Company Ltd, Sioux City, Iowa, USA.*
- [17] *Mechanical kiln inspection. Flsmidth.*

[18] MATICH, D. *Redes neuronales: conceptos básicos y aplicaciones. Grupo de Investigación Aplicada a la Ingeniería Química (GIAIQ).* (2001).

[19] LIN, BAO.; RECKE, B.; KNUDSEN, J.; JORGENSE, S. *A systematic approach for soft sensor development. En: Computers and chemical engineering.* (2007), p. 419-425.

[20] LENNOX, B.; MONTAGUE, G.; FRITH, M.; GENT, C.; BEVAN, VIC. *Industrial application of neural network-an investigation. En: journal of process control.* (2001), p. 497-507.

[21] YOUSEF AL-ASSAFA AND HANY EL KADI. *FATIGUE LIFE PREDICTION OF COMPOSITE MATERIALS USING POLYNOMIAL CLASSIFIERS AND RECURRENT NEURAL NETWORKS.* (2005)

[22] RICHARD G. BUDYNASS; J. KEITH NISBETT. *SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN.* (2008)